

技術報告

UDC 662.614.2 : 669.14-412-977 : 621.182.9

スラブクーリングボイラの開発*

篠原 虔章**・高橋 明人**・白石 典久**

Development of the Slab Cooling Boiler in the Steel Plant

Yoshiaki SHINOHARA, Akito TAKAHASHI, and Norihisa SHIRAIISHI

Synopsis:

Hot slabs after the slabbing mill are at a mean temperature of $1\,000^{\circ}\text{C}$ and have the sensible heat of $160 \times 10^3 \text{ kcal/t-slab}$. The main features of a Slab Cooling Boiler (SCB) are the recovery of the sensible heat to steam ($16 \text{ kg/cm}^2\text{G}$) by mean of heat radiation from the surface of hot slabs, and continuation of cooling process of almost every kind of slab.

The first installation of an SCB was completed at Slabbing Mill No. 2 in Mizushima Works of Kawasaki Steel Corporation and it has been operating successfully since March, 1976.

The capacity of the heat recovery in this SCB is $72\,000 \text{ kcal/t-slab}$. It is equal to or greater than the heat consumption of rimmed and semikilled steel in the soaking pit.

This paper discusses the basic heat transfer experiments performed under this development, the basic planning of the installation, the outlines of the system, and some results of the operations.

1. 緒 言

分塊圧延後の赤熱スラブは剪断後においても、平均温度 $1\,000^{\circ}\text{C}$ で約 $160 \times 10^3 \text{ kcal/t}$ の顕熱を有している。従来この顕熱は、ロータリークーラによる浸水冷却や冷却床における散水冷却・空冷などにより常温まで冷却し利用していなかった。スラブクーリングボイラー (Slab Cooling Boiler, 以下 SCB と称する) は、この赤熱スラブの顕熱をスラブ表面からの放射伝熱により蒸気 ($16 \text{ kg/cm}^2\text{-G}$) として回収し、有効利用を図るとともに冷却工程の連続化省力化ロータリークーラの能力増大を目的として開発したものである。

研究開発を、昭和 45 年に開始し、伝熱基礎実験、実機の基本設計・詳細設計を経て、昭和 49 年に着工、昭和 51 年 3 月世界で初めての設備として、川崎製鉄(株)水島製鉄所第 2 分塊工場で稼動した。以後順調に稼動を続け月間 $15\,000 \sim 20\,000 \text{ t/month}$ の蒸気を発生し、製鉄所の一般蒸気(重油の加熱、保温および噴霧用、酸洗ラインの加熱、化成工場のプロセス用および暖房など)として有効利用している。この SCB では、スラブトン当り $65\,000 \sim 75\,000 \text{ kcal/t-slab}$ の熱を回収することができ、これはリムド鋼、セミキルド鋼の均熱炉で使用する

熱量と同等かそれ以上である。

本報告書では開発にあたって行つた伝熱基礎実験、基本設計、設備の概要および運転実績について報告する。

2. 伝熱基礎実験

2-1 実験の目的

分塊圧延後の赤熱スラブから熱回収を行う場合の伝熱はスラブ表面からの放射伝熱および水冷スキッド (skid) などの接触による熱伝導が考えられる。放射伝熱の場合は、放射率・角関係を含めた総括熱吸収率を求める必要がある。接触による熱伝導は、積極的に利用すべき伝熱方式であると考えられるが、スキッドとスラブの接触部の熱流束を正確に知る必要がある。これらの伝熱特性を把握することは、熱回収設備の伝熱方式の選定、スラブの冷却速度およびスラブからの熱回収量を求めるにあたって最も重要なものである。そのために実スラブ一枚が装入できる実験装置を製作し、伝熱基礎実験を実施することにした。

2-2 実験装置と実験方法

実験装置は、水冷パイプで構成し、上部はスラブ表面からの放射伝熱量を、下部は水冷スキッドの接触による熱伝導量を測定することを目的としている。装置の周囲

* 昭和 53 年 3 月 23 日受付 (Received Mar. 23, 1978)

** 川崎製鉄(株)水島製鉄所 (Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-dori Kurashiki 712)

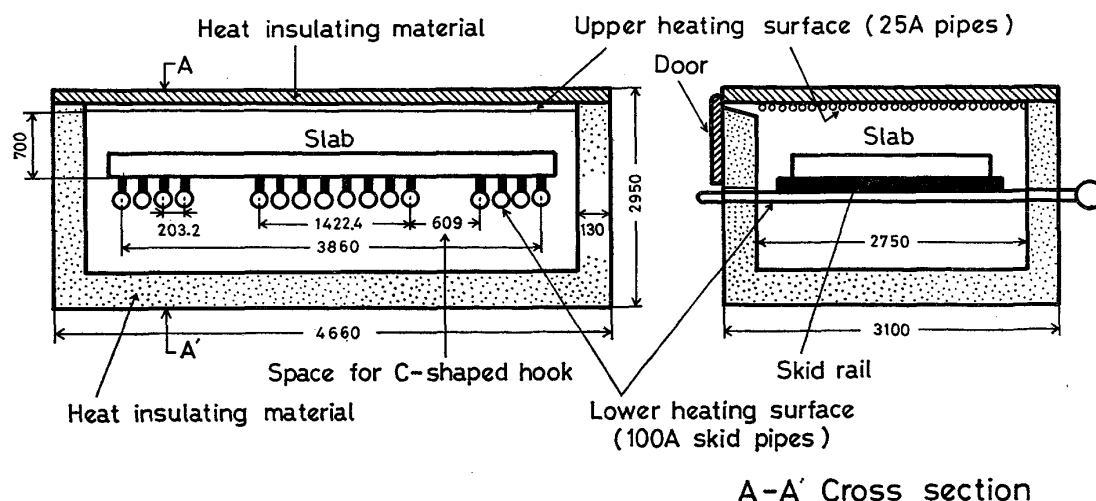


Fig. 1. Cross section of experimental apparatus.

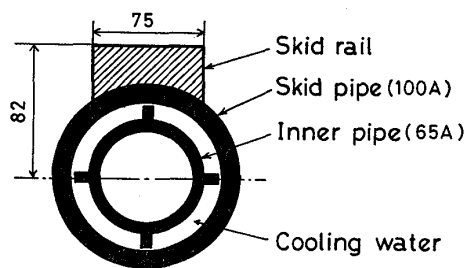


Fig. 2. Cross section of skid.

は断熱し、伝熱量は水量と温度差から求めることにしている。Fig. 1は実験装置の概略図で、Fig. 2はスキッドの断面を示したものである。

実験は、分塊圧延後の赤熱スラブを直接装入して行う場合と冷スラブを加熱炉で加熱して装入する場合とにわけて行った。前者の場合は、実スラブ表面からの放射伝熱量を求めることを主体とした。なおこの場合スラブの表面温度はシーす熱電対の接触法により測定した。後者の実験は必要な部分に熱電対を取りつけ、詳細な伝熱特性を把握することを目的とした。特にスキッドの接触による熱伝導、スラブの冷却速度およびスラブ表面温度測定法のちがいによる差（熱電対溶接による方法¹⁾とシーす熱電対の接触による方法）などを求めることにした。接触による熱伝導はスラブとスキッドの接触面圧（kg/m²）によつて変化するから、この面圧はスラブを受けるスキッドの本数を変えることにより変更した。Photo. 1は、実験装置とスラブの測温状況を示したものである。

2.3 実験結果

2.3.1 スラブ表面からの放射伝熱量

Fig. 3は、スラブ表面温度と放射伝熱量の関係を示したものである。分塊圧延後の実スラブ表面温度は、シー

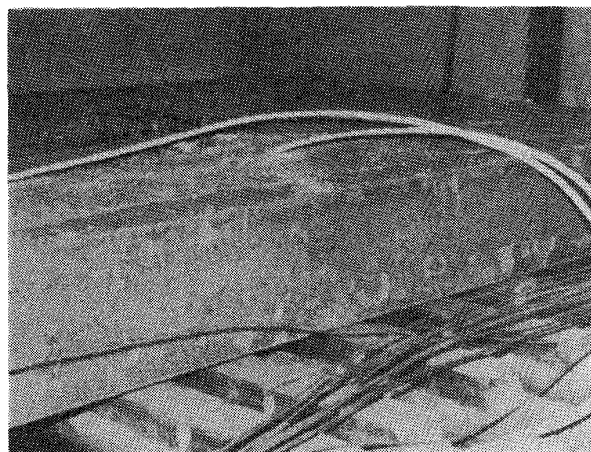


Photo. 1. Experimental apparatus and slab temperature measurements.

ス熱電対の接触法により測定したので、Fig. 4により補正した。Fig. 4は、熱電対溶接法¹⁾とシーす熱電対の接触法との差異を実験装置により求めたものである。

スラブ表面から水冷伝熱管への放射伝熱量は、ステファンボルツマンの放射伝熱量の式²⁾³⁾

$$Q = 4.88 \cdot \phi_{CG} \cdot$$

$$\left\{ \left(\frac{t_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_0 + 273}{100} \right)^4 \right\} \text{ kcal/m}^2\text{h} \dots (1)$$

ϕ_{CG} ; 総括熱吸収率

t_s ; スラブ表面温度 °C

t_0 ; 水冷伝熱管温度 °C

において、 ϕ_{CG} を 0.8~1.0 にとればよいことを示している。特にスラブ表面温度 600°C 以上では、 ϕ_{CG} は 0.8 に近いことを示している。

2.3.2 スキッド接触による熱伝導

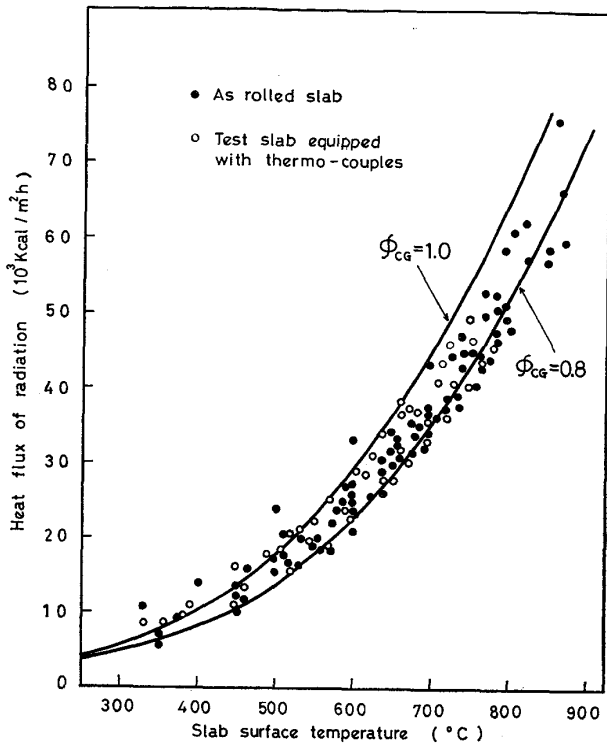


Fig. 3. Relation between slab surface temperature and heat flux of radiation.

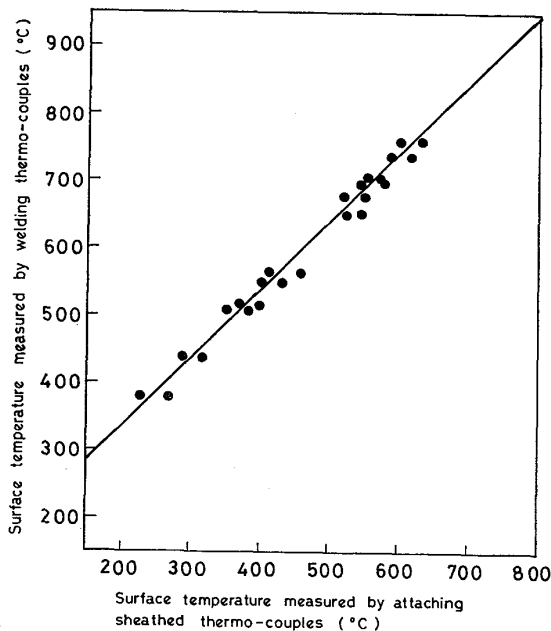


Fig. 4. Relation between slab surface temperature measured by attaching sheathed thermo-couples and measured welding thermo-couples.

Fig. 5 は、スラブ下面からスキッドレールへの熱流束を、面圧 (kg/m²) をパラメーターとして、熱伝達係数 (kcal/m²h°C) で示したものである。この熱伝達係数はスラブから 5 mm 離れた非接触スキッドを設け、こ

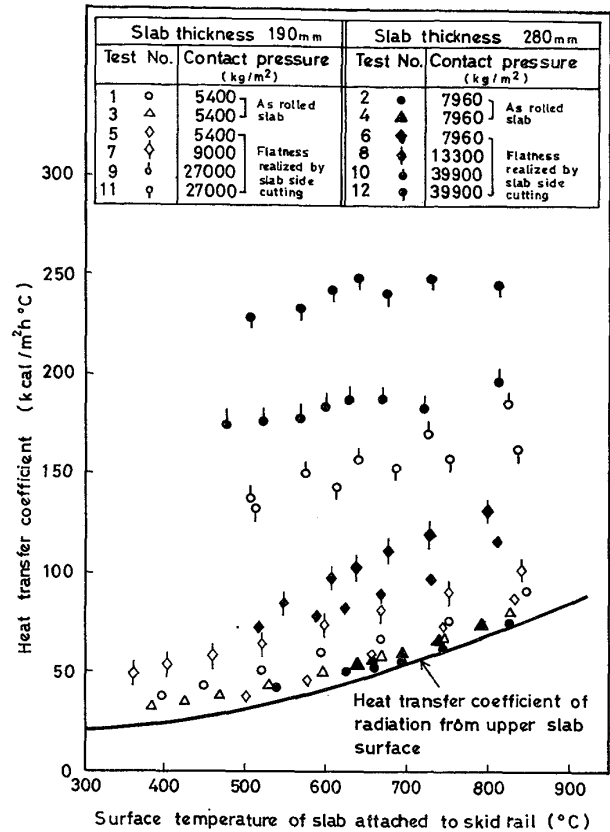


Fig. 5. Effect of contact pressure on heat transfer coefficient. Contact pressure; weight of slab divided by skid rail area (kg/m²).

の受熱量を基準として次の (2) 式により算出した。

$$h = \left[(q_1 - q_0) / A + 4.88 \cdot \epsilon_{cg} \cdot \left\{ \left(\frac{t_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_r + 273}{100} \right)^4 \right\} / (t_s - t_r) \right] \quad (2)$$

h ; スキッド接触部の熱伝達係数

kcal/m²h°C

q_0 ; 非接触スキッドの受熱量 kcal/h

q_1 ; 接触スキッドの受熱量 kcal/h

A ; スキッドレールが接触する面積 m²

ϵ_{cg} ; 総括熱吸収率で 0.8 とする

t_s ; 接触部スラブ表面温度 °C

t_r ; 接触部スキッドレール表面温度 °C

面圧を大きくすると熱伝達係数は大きくなって行くが同一面圧であつても接触しぐあいによつて差があり、面圧のみでは説明しきれていない。

試験 No. 1 ~ No. 4 は、分塊圧延したままのスラブで、最終パスで巾だしをするため両端の厚みが厚くなっている。このためスラブとスキッドレールとが全面にわたつて均一に接触せず面圧との関係がない。したがつて熱伝導による熱伝達係数の増加があまりなく、上面放射

熱と同等か多くても 20% 増程度であつた。

試験 No. 5～No. 12 は、スラブの両端を 200 mm カットし平坦さをだし、スラブとスキッドの接触が均一になることをねらつたものである。この場合は、面圧との関係がよくでており、面圧 $39\,900\text{ kg/m}^2$ で上面放射伝熱の 3.5 倍の熱伝達係数がとれることを示している。

2.3.3 スラブの冷却速度

厚み 190 mm の試験スラブでスキッドの影響のない部分の冷却曲線を Fig. 6 に示した。また伝熱差分方程式 1 次元⁴⁾で同一部分を計算した結果も示している。なお計算では、スラブ表面からの放射伝熱量は、総括熱吸収率 $\phi_{CG}=0.8$ 、周囲温度 40°C とし、スラブの物性値⁵⁾は、リムド鋼 0.06%C 鋼のものを使用した。500°C 以上の高温部では、実測値と計算値とが、よく一致している。

2.3.4 スキッド接触部の温度分布

厚み 190 mm のスラブのスキッド接触部の温度分布を伝熱差分方程式 2 次元⁴⁾で計算した。計算では、スキッドレールとスラブ間の熱伝達係数を実験結果に合わせて $180\text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ とし、スキッドパイプ内の水の温度 40°C 、水の対流熱伝達係数 $2\,000\text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 、スキッドの物性値⁵⁾はキルド鋼 0.08%C 鋼のものを使用した。その他の計算条件は前項と同一とした。

Fig. 7 は実験装置へ装入してから 15 min 経過した時の温度分布でありまた同時刻の実測値も記入した。計算値と実測値とが完全に一致しているとは言えないが、ほぼ接触による熱伝導の実態をよく表わしている。スラブ内の厚み方向の温度勾配を、スラブ表面から 10 mm までの範囲で比較すると、スキッド接触部は 12°C/mm 、非接触部（スラブ上面）は 1.7°C/mm であり接触がよければ冷却速度が早くなることを示している。

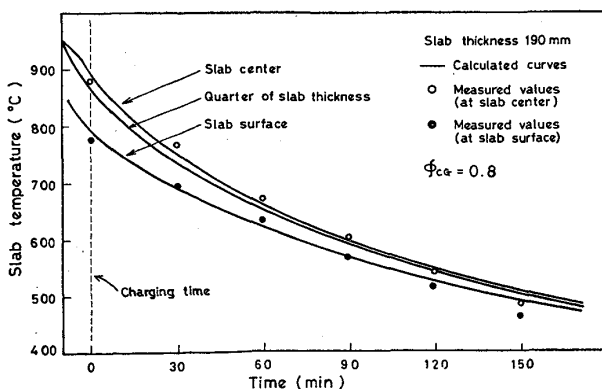


Fig. 6. Measured and calculated values of slab cooling curves.

3. SCB の基本設計

3.1 SCB 内の伝熱方式

伝熱基礎実験によると、スキッドの接触による熱伝導は、接触がよければ放射伝熱の 3.5 倍も大きくとれることを示した。しかしスキッド全面にわたって均一にこの程度に接触をよくすることはむづかしい。特に分塊アズロールのスラブでは、最終パスで巾だしを行うため両端の厚みが厚くなっているから、一層均一な接触は困難となる。部分的に非常に接触がよくなったとすると、スラブ内の温度分布が Fig. 7 に示したとおり不均一な温度分布となり、接触部の温度勾配が 12°C/mm にも達する。このため割れ、曲りなどの問題を起こすことも考えられる。またスキッドパイプを伝熱管として使用すると、接触のよいときには、 $200 \times 10^3\text{ kcal/m}^2\text{h}$ の熱負荷が伝熱管に加わり、ボイラー管としては特別な対策を講ずる必要がでてくる。

以上のような理由から、SCB 内の伝熱方式は、むしろ放射伝熱のみにしたほうがよいとの結論に達した。このため、スラブ搬送設備のウォーキングビーム (Walking Beam) の移動・固定ビームともにドライスキッドにして、接触による熱伝導の効果をさけることにした。

3.2 SCB の長さ

SCB の長さは、熱回収量と設備費とからより経済的であることおよび従来の空冷散水材がロータリークーラー入口で変態点温度以下に降下することを条件とした。

均熱炉から抽出された鋼塊が、分塊圧延を経てスラブ

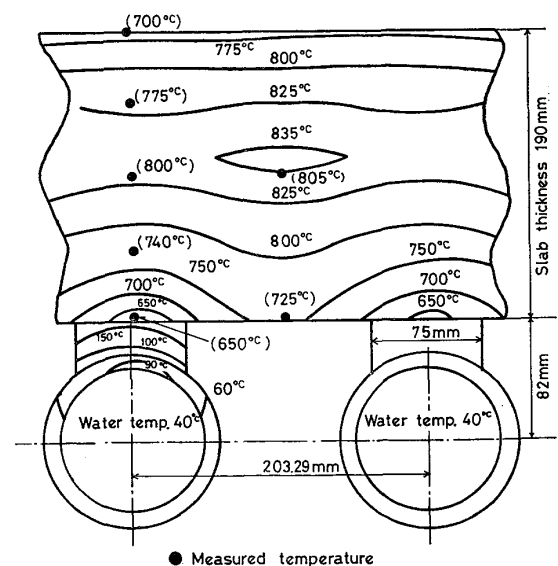


Fig. 7. Calculated and measured temperature distribution of slab riding on skid pipes. (15 minutes after slab charging)

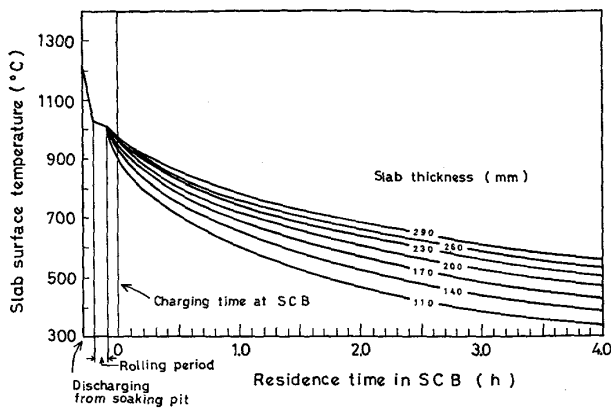


Fig. 8. Calculated cooling curves of slab (surface).

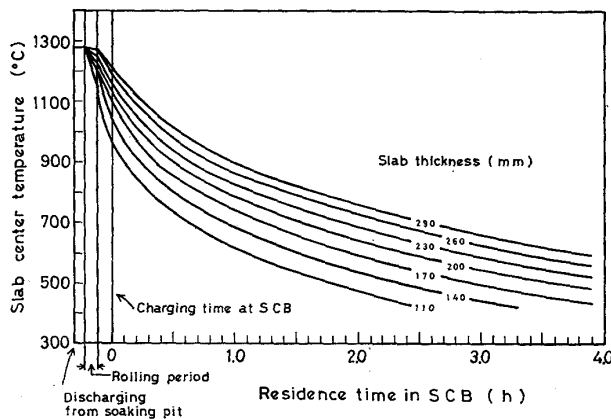


Fig. 9. Calculated cooling curves of slab (center).

となり、SCB に装入されてさらに冷却される。この一連の冷却過程を計算により求めた結果が Fig. 8, Fig. 9 である。Fig. 8 はスラブの表面温度、Fig. 9 は中心温度である。なお計算は周囲温度 200°C とし、その他の計算条件および物性値は 2・3・3 項と同一とした。このスラブの冷却曲線から、SCB 内でスラブが失う熱量が計算でき、この熱量が蒸気として回収されることになる。このことを利用して、第 2 分塊工場のスラブを対象に、SCB の長さや蒸気発生量との関係を、シミュレーションモデルにより求めた。その結果を Fig. 10 に示した。Case 1 は、水島製鉄所粗鋼 1200 万 t/y を想定した、第 2 分塊工場スラブ平均処理量 412 t/h の場合で、Case 2 は 800 万 t/y でスラブ平均処理量 252 t/h の場合である。

この結果によると、SCB の長さは 50~60 m がよいところであり、特に Case 2 では 60 m 以上は必要でないことを示している。また従来の空冷散水材は、この程度の長さがあれば、それらの圧延量から考えて SCB 内滞留時間が 2.5 h とれる。したがって Fig. 8, Fig. 9 からロータリークーラー入口では、 700°C 以下となり変

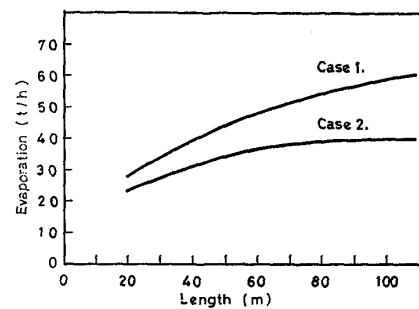


Fig. 10. Relation between length of SCB and evaporation.

Case 1 ; Result of simulation at 412 t-slab/h

Case 2 ; Result of simulation at 252 t-slab/h

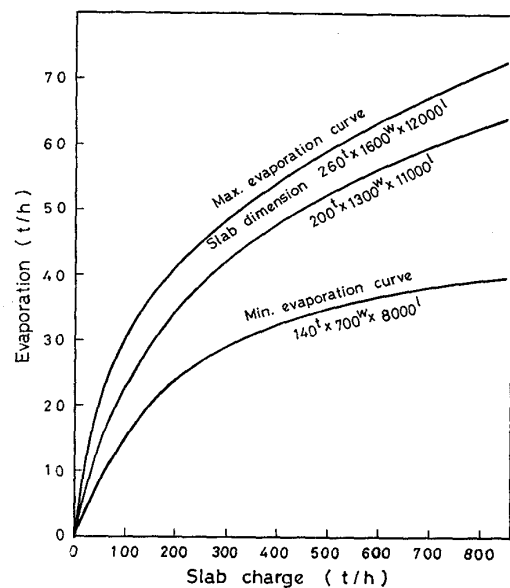


Fig. 11. Relation between slab charge and evaporation.

態点温度以下になることがわかる。以上のことから、SCB の長さは、全長で 54 m とすることに決定した。

SCB の長さを 54 m とした時のスラブ処理量と蒸気発生量の関係を Fig. 11 に示した。これにより SCB の平均蒸気発生量は、効率を考慮して 40 t/h、最大 70 t/h として設計することにした。

3・3 SCB の工場配置

第 2 分塊工場における SCB の配置図を Fig. 12 に示した。SCB は、プレクーリング設備でもあり、ここで赤熱スラブの顕熱の一部を回収し冷却したあと、ロータリークーラーへ送り浸水冷却により常温まで冷却する。したがって圧延ラインにバイパスして設置し、SCB は 2 分割して折り返すシステムとした。No. 1, No. 2 SCB とも長さ 27 m、巾 13 m である。このようにすることにより、SCB の故障時またはボイラー官庁検査時などにおいても圧延ラインを停止させる必要がない。また一

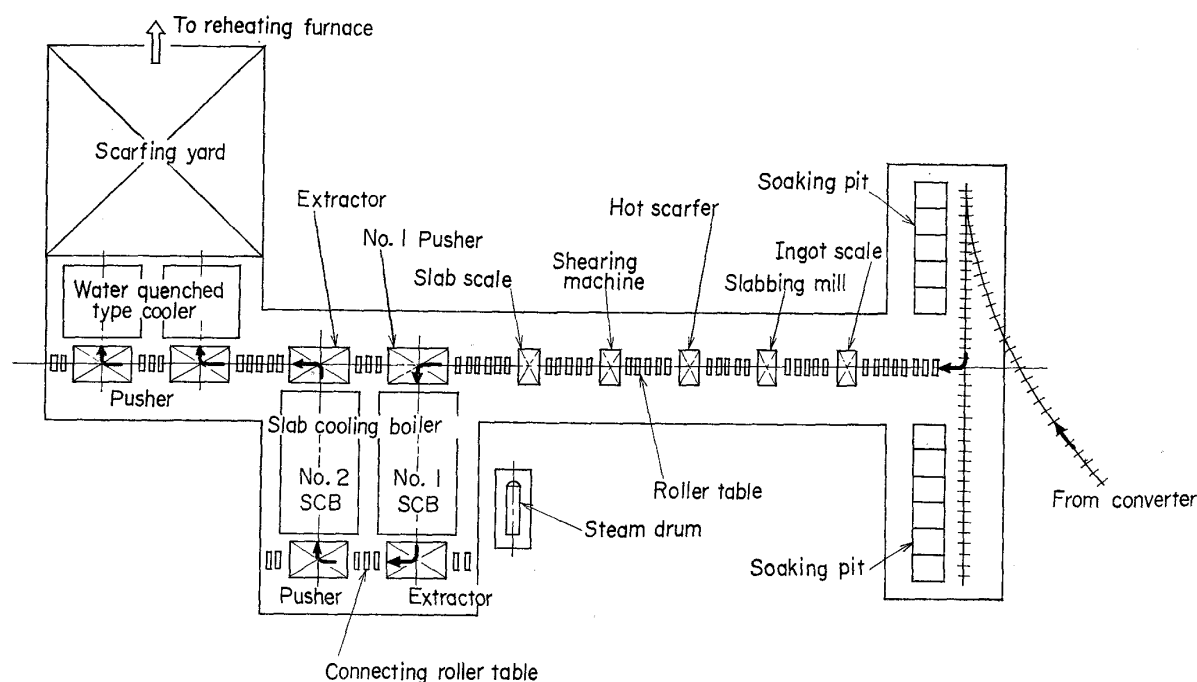


Fig. 12. Layout and slab flow.

般材はもちろんのこと、冷却床において空冷・散水により冷却していたスラブも連続化して処理することができ。なお SCB へのスラブの装入・抽出およびロータリークーラーへの搬送などすべてを自動化している。

3.4 蒸気送気系統

SCB から発生する蒸気は、水島製鉄所南北 8 km にわたって配管してある蒸気本管の中央部に送気し、工場一般蒸気 ($16 \text{ kg/cm}^2\text{G}$) として使用する。この蒸気の発生設備は、燃料燃焼ボイラー、転炉排熱ボイラー、タービンからの抽気、背圧蒸気、高圧蒸気 ($88 \text{ kg/cm}^2\text{G}$) からの減圧減温、それに SCB である。使用設備の主なものは、重油の加熱、保温および噴霧、冷圧酸洗ラインの加熱、化成工場のプロセス用、製鋼脱ガス装置用、潤滑油の加熱保温および暖房風呂などである。これらの蒸気は、発生側、使用側ともに季節的、時間的変動がある。長期的変動については、タービンからの抽気、背圧蒸気および燃焼ボイラーの運転基数などにより需給バランスをとり、時間的変動は燃焼ボイラーによつて需給バランスをとっている。燃料燃焼ボイラーでは、蒸気本管の圧力を燃料使用量で制御しているから、SCB から発生する蒸気が多い時には、この燃料使用量が減少する。すなわち SCB での熱回収は、燃料を節約することになる。

4. SCB 設備の概要

4.1 装入スラブの仕様

第2分塊工場では、ホットストリップ向けと厚板向け

Table 1. Slab specification.

	Slab for hot strip mill	Slab for plate mill
Thickness (mm)	150~260	110~300
Width (mm)	700~2 200	1 000~2 200
Length (mm)	4 200~6 000 10 200~12 200	3 000~5 350
Weight (kg)	max. 40 000	max. 30 000
Charging rows of slab	1 or 2	2
Slab temperature		
Surface ($^{\circ}\text{C}$)	900~1 000	900~1 000
Center ($^{\circ}\text{C}$)	1 050~1 200	950~1 220

スラブの2種類があり、スラブ寸法も種々ある。本 SCB に装入可能なスラブ仕様は、Table 1 のごとくであり、これ以外の寸法のものおよび合金鋼で保熱炉で徐冷を指定されたものは装入できない。現在では、90% が装入可能となつている。

4.2 SCB 本体の構造

Fig. 13 は、SCB の概略図である。SCB は、上部伝熱面、下部伝熱面およびスラブの搬送設備であるウォーキングビームで構成している。長さは1基 27 m、上部伝熱面の巾 13 m、上部伝熱面と、下部伝熱面の間隔 1.2m である。上部伝熱面は、SCB の巾方向にボイラーチューブを密着して配列し門型に組んだ1ユニットを10個長手方向に組み合わせて、1基の SCB を構成する。Photo. 2 は、上部伝熱面の1ユニットを示している。下部伝熱面は、ウォーキングビームの固定ビームと移動ビ

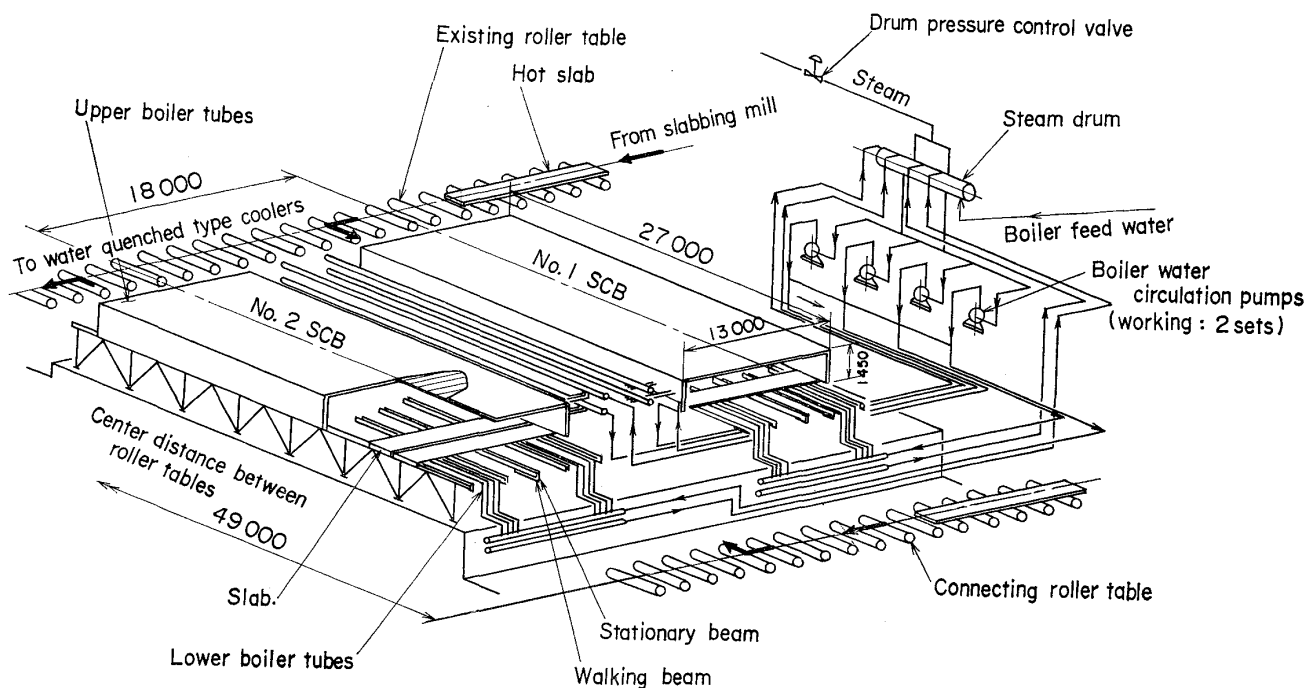


Fig. 13. Schematic drawing of slab cooling boiler.

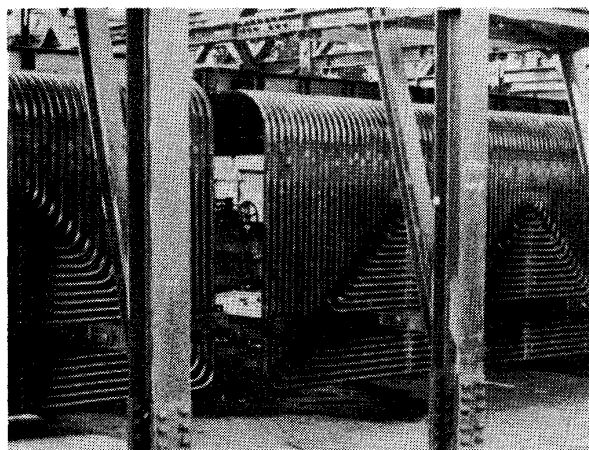


Photo. 2. Upper boiler tubes under construction.

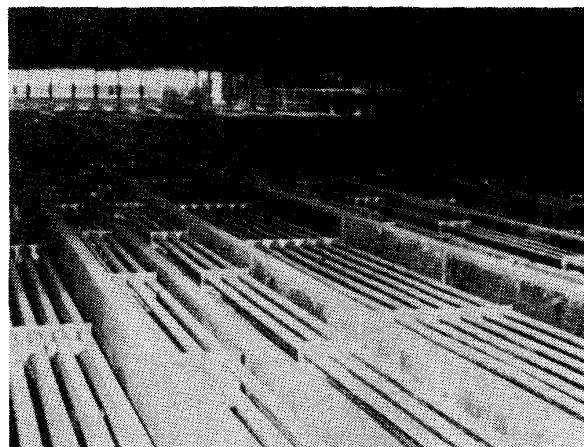


Photo. 3. View of lower boiler tubes and walking beams.

ームの間に、長手方向に 90 mm の間隔で上下 2 列格子状に、ボイラーチューブを配置している。これはスラブから落ちるスケールの堆積を、防止するためである。Photo. 3 は、下部伝熱面の伝熱管の配列状況を示している。

ウォーキングビームの移動ビームは、巾方向に 8 列、固定ビームは 16 列であり、駆動は油圧傾斜レール方式である。

4.3 ボイラ設備

SCB は強制循環式で、ボイラー循環水は循環ポンプにより蒸気ドラムから No. 1, No. 2 SCB の上下伝熱面に供給される。各伝熱面での熱吸収により気水混合物となった循環水は、蒸気ドラムにもどり水と蒸気に分離さ

れ、蒸気のみが蒸気本管へ送気される。Table 2 にボイラー設備の主な仕様を示した。特に停電時などの保安対策として、SCB は燃料燃焼ボイラーのように燃料遮断といったような対策がとれないから、蒸気駆動の循環ポンプ 2 台および給水ポンプ 1 台を備えている。蒸気ドラム、循環ポンプ、給水ポンプおよび脱気器などは、屋外のボイラーステーションに、一括して設置している。Photo. 4 はこのボイラーステーションを示している。

5. 運転実績

SCB は、昭和 51 年 3 月世界で初めての設備として稼動し、その後も順調に運転している。Photo. 5 は、

Table 2. Boiler specification.

Steam pressure	16 kg/cm ² G at saturation temperature
Evaporation	Max. 70 t/h Ave. 40 t/h
Heating surface (total)	3 054 m ² (No. 1, No. 2 SCB)
Boiler water circulating pumps	
—Numbers required	Two sets of motor-driven pumps (working),
—Power	Two sets of turbin-driven pumps (stand-by).
Boiler feed water pumps	150 kW
—Numbers required	One set of motor-driven pump (working),
—Power	One set of turbin-driven pump (stand-by).
Steam drum	90 kW
	1 700 mm ϕ $\times$ 11 000 mm

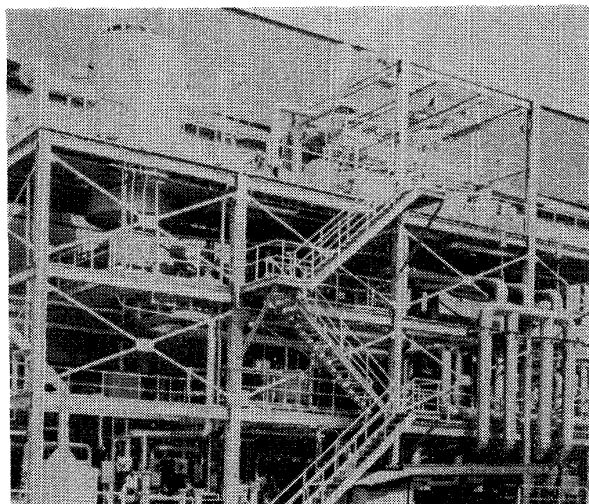


Photo. 4. A view of boiler unit; steam drum, boiler water circulating pumps, boiler feed water pumps, and deaerator.

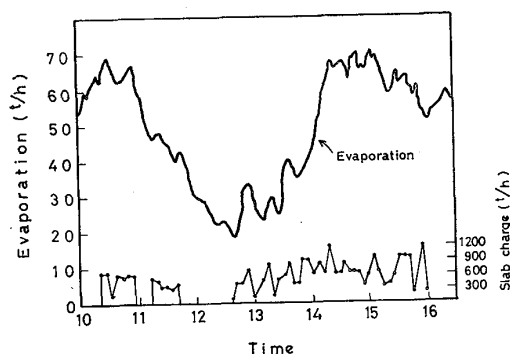


Fig. 14. Chart of evaporation and slab charge.

No. 1 SCB のスラブ装入側からみた SCB の全景である。

5.1 スラブ装入量と蒸発量

蒸発量はスラブの寸法、鋼種、重量および装入ピッチなどの装入条件により変動する。Fig. 14 は、数時間におけるスラブ装入量と蒸発量の関係を、実際のチャートで示したものである。最大蒸発量 70 t/h を示し計画通りの性能があることを示している。

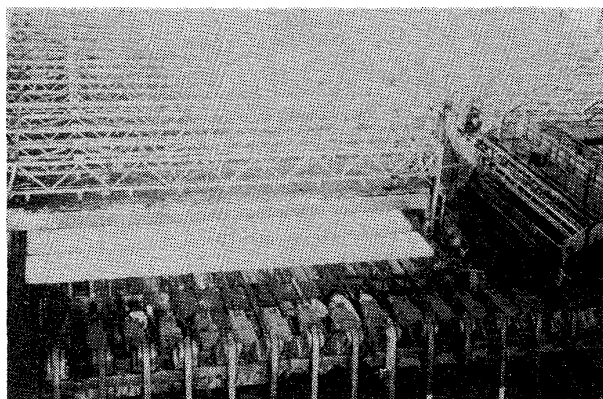


Photo. 5. General view of Slab Cooling Boiler (No. 1 SCB charging side).

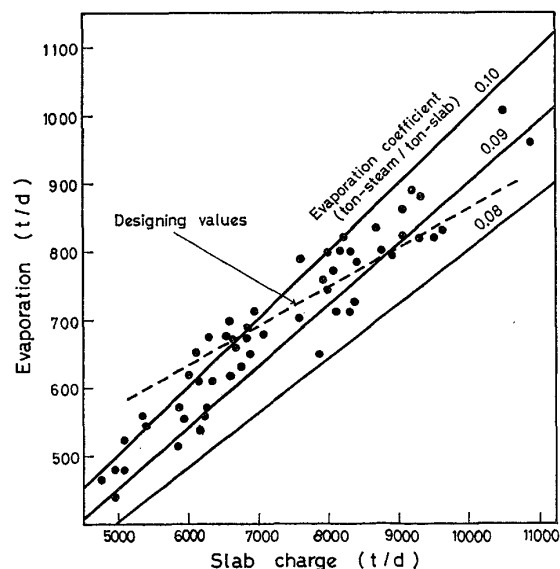


Fig. 15. Relation between slab charge and evaporation.

Fig. 15 は、スラブ装入量、蒸発量および送気係数の関係を示したものである。ここで送気係数 = 蒸発量 (t) / スラブ装入量 (t) と定義している。送気係数は SCB 内の滞留時間に大きく影響される。Fig. 15 中点線は計画の送気係数であり、装入量が大きくなるほど小さくな

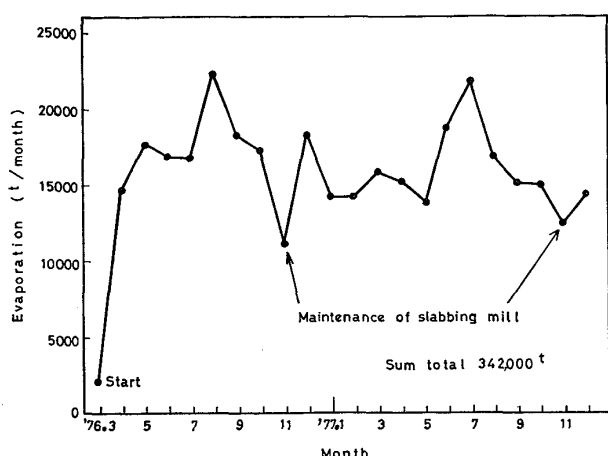


Fig. 16. Evaporation in a month.

ついていくことを示している。実績値と計画値を比較すると、装入量が多い時は計画値を上まわり小さい時は計画値を下まわっている。このことは、高温のスラブがSCB内に滞留する時は、計画値以上の回収効率があることを示している。

送気係数 $0.10 \text{ t-steam/t-slab}$ の場合、この蒸気を燃料燃焼ボイラーで蒸発させるとすると $72,000 \text{ kcal}$ が必要である。すなわち $72,000 \text{ kcal/t-slab}$ の熱エネルギーを回収していることになる。これは、リムド鋼、セミキルド鋼の均熱炉で使用する熱量に等しいかまたはそれ以上である。

5.2 月間の蒸気発生量

Fig. 16 に、昭和 51 年 3 月から昭和 52 年 12 月までの月間蒸気発生量を示した。SCB を通過する月間のスラブ量により変動するが、月間平均で $16,300 \text{ t/month}$ また累計で $342,000 \text{ t}$ であった。これによる燃料節約量はミナス重油換算で $28,000 \text{ kl}$ である。

この他に、ロータリークーラーでの海水使用量を 60%削減することができ、温排水を減らすとともに電力の節約にもなっている。また SCB を通すことにより、ロータリークーラーでの急冷がさけられるので、スラブの形状が非常によく、あと工程でのスラブのハンドリングおよび手入れ作業などがしやすくなっている。

6. 結 言

SCB は、分塊圧延後の赤熱スラブの表面からの放射伝熱によりその顕熱の一部を蒸気として回収し有効利用を図るとともに、スラブ冷却工程の連続化・省力化およびロータリークーラー能力増大などを目的として、当社と川崎重工業(株)とで共同開発し、水島製鉄所 $1,200 \text{ t/y}$ 体制の増強設備として、第 2 分塊工場に設置したものである。開発にあたって行つた伝熱基礎実験では、スラブ表面からの放射伝熱では総括熱吸収率 $\phi_{CG}=0.8$ であること、スキッドの接触による熱伝導は、接触がよく面圧 $39,900 \text{ kg/m}^2$ であれば放射伝熱の 3.5 倍に達し熱流束も $200 \times 10^3 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ あることがわかった。しかし実スラブで接触部全面にわたってこの程度に接触をよくすることはむづかしく、SCB 内での伝熱方式は、スラブの割れ、曲りおよびボイラーチューブへの高熱負荷などを考慮して、放射伝熱のみによることにした。

昭和 51 年 3 月稼動以来、昭和 52 年 12 月までに累計 $342,000 \text{ t}$ の蒸気を発生させ、ミナス重油に換算して $28,000 \text{ kl}$ を節約したことになる。SCB 通過スラブトン当りでは $72,000 \text{ kcal/t-slab}$ でありこれはリムド鋼、セミキルド鋼の均熱炉で使用する熱量と等しいかまたそれ以上である。

製鉄所には、高温固体の状態で未利用のエネルギーが他にも多々あり、固体放射伝熱を有効に利用したこの SCB の技術は、この分野において役立つものと思う。

最後に、SCB の共同研究開発にあたり、昭和 46 年以来終始ご協力を頂いた川崎重工業(株)ボイラー設計部、製鉄機械部その他関係部門の方々に心から感謝の意を表します。

文 献

- 1) 熱経済技術部会加熱炉小委員会：特別報告書，No. 11，連続鋼片加熱炉における伝熱実験と計算方法，(1971)，p. 10 [日本鉄鋼協会]
- 2) 同上 p. 6
- 3) 槌田 昭，山崎慎一郎，秋山光庸：伝熱工学演習 (1965) p. 171 [学献社]
- 4) 熱経済技術部会加熱炉小委員会：特別報告書，No. 11，連続鋼片加熱炉における伝熱実験と計算方法，(1971)，p. 68 [日本鉄鋼協会]
- 5) 同上 p. 80